

장축베벨기어의 단조

old Forging of ong haft evel

*전병윤¹, 김홍태², 이진혁³, 박정휘², 조광제⁴, #전만수⁴

*B. Y. Jun¹, H. T. Kim², J. H. Lee³, J. H. Park², K. J. Cho⁴, #M. S. Joun(msjoun@gnu.ac.kr)⁴

¹ 진엔지니어링, ² 경상대학교 대학원, ³(사)경상대 수송기계부품기술혁신센터, ⁴ 경상대학교 기계항공공학부

Key words : Long Shaft Bevel Gear, Forging Simulation, Enclosed Die Forging, Sizing Process

1. 서론

기어는 단조 기술자가 관심을 가지는 주요 분야 중의 하나이다¹⁾. 그 중에서도 베벨기어의 단조가 가장 보편화되어 있다. 베벨기어의 열간단조는 1950 년대에 독일에서 시작되었으며, 베벨기어의 냉간단조¹⁻⁸⁾는 1970 년경부터 시작되었다. 우리나라는 1980 년대 말경에 베벨기어 냉간단조를 시작한 것으로 추정되고 있다. 베벨기어의 단조는 이미 국내에서 십 수년간 실시되어 왔지만, 아직 선진업체에 요소 기술을 의존하고 있는 실정이다. 그 일례로 우리나라에서 승용차용 베벨기어는 대부분 절삭가공되고 있는 반면, 일본에서는 단조로 생산되고 있다. 국내에서 생산중인 일부의 승용차용 베벨기어도 금형 등의 요소 기술을 대부분 해외의 선진업체에 의존하고 있다.

베벨기어는 동력 전달 축의 방향을 변환시킬 때 사용된다. 따라서 축과 베벨기어의 연결은 필수적이다. 대개 베벨기어의 내부에 가공되어 있는 스플라인을 통하여 축과 연결되는 경우가 많다. 차동기어가 그 대표적인 예이다. 그리고 축의 끝에 베벨기어가 고정되어 있는 연결 방식도 자주 활용되고 있다. 동력전달 등의 목적으로 사용하는 피니언 기어가 그 대표적인 예이다. 이러한 베벨기어와 축을 장축 베벨기어로 칭한다.

현재까지 일반적으로 장축베벨기어는 긴 소재를 기계가 공하거나 베벨기어와 축을 마찰용접함으로써 제작되고 있다. 그 이유는 일반 기계식 단조장비의 스트로크의 한계, 폐쇄단조 기술의 한정된 적용, 위치결정에 필요한 방향성 등의 원인 때문이다.

본 연구에서는 전술한 문제를 극복하고 단조 시뮬레이션 기술을 활용하여 공정최적화를 실시함으로써 장축베벨기어 단조 기술을 개발하고자 한다.

2. 장축베벨기어의 단조공정

본 연구에서 적용 대상으로 선택한 장축베벨기어는 농기계(이앙기)에 장착되는 것으로 Fig. 1 에서 보는 바와 같다. 목표로 하는 베벨기어의 등급은 6 급 정도이다.

Fig. 1 의 장축베벨기어의 단조를 위한 공정도를 Fig. 2 에 나타내었다. 단조공정은 총 3 단으로 이루어져 있으며, 제 1 단은 폐쇄단조 공정이고, 제 2 단은 개방형단조 공정이며, 제 3 단은 사이징 공정으로 일반 형단조 공법을 채택하고 있다.

폐쇄단조를 위하여 사용한 다이세트는 복동링크유압식 폐쇄다이세트⁹⁾이며, 그 개념도가 Fig. 2 에 도시되어 있다. 1 공정은 소재경 대비 전장이 길어 성형 시 소재의 좌굴문제를 해결하기 위한 폐쇄단조 공정이며 2 와 3 공정은 적용 베벨기어가 일반적인 베벨기어의 치형각인 90° 보다 작은 45°의 치형각을 지니고 있어 소성유동이 난이하므로 이를 극복하기 위한 것, 즉 치부위의 살체움을 목적으로 한다. 이러한 공정을 통해 원소재의 절감이 가능하다.

3. 단조 시뮬레이션 기술을 활용한 공정의 최적화

장축베벨기어의 재료는 SCM420 이며, 이황화몰리브덴(MoS₂) 윤활처리를 실시하였다. 단조 시뮬레이션 기술을 활용하여 최종적으로 결정된 소재의 반경과 높이는 각각 12.0 mm 와 168.7 mm 이다.

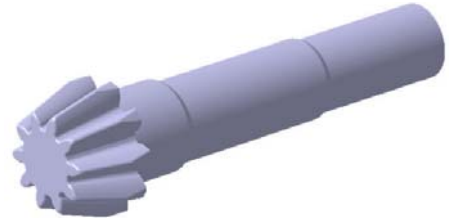


Fig. 1 A long shaft bevel gear CAD model to be developed

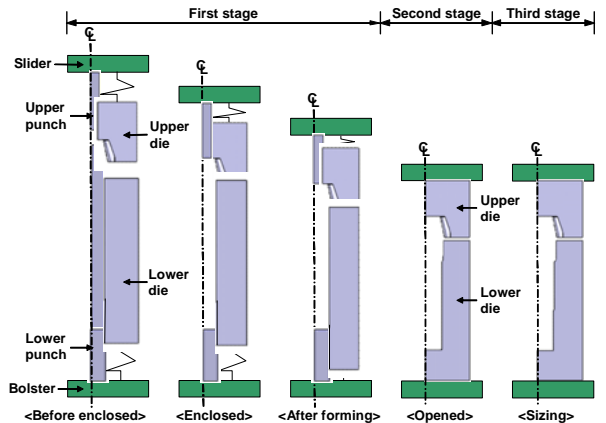


Fig. 2 Schematic description of the bevel gear forging process

본 연구에서는 장축베벨기어 성형과정 중 가장 중요한 1 단 폐쇄단조 공정을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용된 공정 및 해석 정보는 다음과 같다.

- 소재의 변형저항식: $\bar{\sigma} = 816.0\bar{\epsilon}^{0.09}$ MPa
- 금형 속도: Fig. 3,
- 마찰상수: 0.1(상·하형)

베벨기어의 잇빨 수가 10 개 이고 대칭면이 20 개 이므로 전체 해석영역의 1/20 을 실제 해석영역으로 간주하였다. 단조 시뮬레이터로 외곽형상의 보존과 요소망생성 기능이 탁월한 AFDEX 3D¹¹⁾가 사용되었으며, 시뮬레이션 도중에 사면체 요소망의 수가 150000 개 내외가 되도록 하였다. 특히, 단조품의 길이가 길고, 변형 영역이 국부적으로 집중되어 있는 공정의 특성을 감안하여 요소밀도를 제어함으로써 결과의 정확성을 제고시켰다.

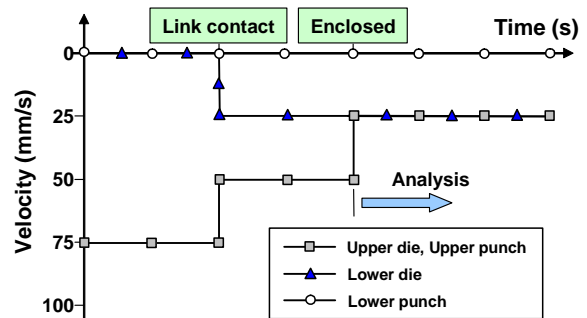


Fig. 3 Velocity profile

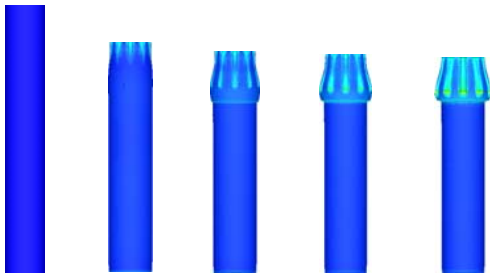


Fig. 4 Predicted shape

장축베벨기어 단조에서 제 1 단의 역할은 매우 중요하다. 재료의 전체적인 분배가 이루어지기 때문이다. Fig. 4 에 최종적으로 선정된 공정설계에서 폐쇄단조 공정인 제 1 단의 해석결과를 나타내었다. 베벨기어 단조와 같이 정형단조 공정의 해석에서 결과의 정확도는 매우 중요하다. 결과의 정확도는 요소망의 품질에 가장 큰 영향을 받으므로 단조 시뮬레이션 시에 이에 관한 세심한 주의가 요구된다. 본 연구에서 사용한 AFDEX 3D 는 장축베벨기어 단조에서 요구하는 이러한 특성을 고려하고 있다. 이러한 특성은 Lee 와 Joun 이 개발한 지능적 요소망생성기법¹⁰⁾의 결과이다.

4. 실험 및 결과의 검토

본 연구에서는 장축베벨기어의 CAD 모델로부터 CAM 정보를 생성하여 고속가공기로 금형을 직접 제작하였다. Fig.5 는 고속가공기로 제작된 금형과 펀치를 나타내고 있다.

장축베벨기어의 폐쇄단조에 사용하는 소재는 단조시에 형상 변화가 극심하므로 구상화 풀림(Spheroidizing annealing)을 통하여 소재를 연화시켰다. 풀림처리된 소재를 0.4 ~ 1 mm 의 강구로 쇼트피닝(Shot peening)함으로써 소재로부터 스케일, 탈탄층 및 표면의 이물질을 제거하였다. 그리고 베벨기어 폐쇄단조가 심한 형상변화를 동반하므로 일반 윤활보다는 윤활성이 뛰어난 이황화몰리브덴(MoS2) 윤활을 사용하였다.

시험생산에 사용된 장비는 (사)경상대 TIC 의 보유장비인 유압 프레스(MSF-1000AD)와 폐쇄다이세트(MSF-1000A-K.D.S)이다. 유압 프레스는 가압능력 10,000 kN, 행정길이 600 mm 등의 사양을 지니고 있다.

실험 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 육안검사 결과 윤활막의 불량, 성형상태의 결육 및 겹칩, 크랙, 버(Burr) 등이 발생하지 않았다.



Fig. 5 Dies and punches for the long shaft bevel gear forging



Fig. 6 Experimental results

Fig. 4 와 Fig. 6 으로부터 실험결과와 해석결과가 매우 유사함을 알 수가 있다. 즉, 상·하편치의 스트로크에 따라 비교한 결과, 소재가 차 들어가는 형상과 치형이 생성되는 모습이 매우 유사한 결과를 보였다. 해석에 의하여 발생한 부피 변화는 0.1% 이하로 나타났다.

· 결론

본 연구에서는 장축베벨기어의 정밀 냉간단조 공정 기술을 제시하였다. 제시된 공법은 이양기 구동축에 적용되었다. 제안된 공법은 3 단의 냉간단조 공정으로 이루어져 있고, 첫 공정에서는 폐쇄단조 공법을 사용하여 소재를 안배하면서 동시에 베벨기어의 기본 치형을 생성하며, 두 번째 공정에서 기어 이빨을 정밀 성형함으로써 원하는 품질의 장축베벨기어를 성공적으로 제조하였다.

공정 최적화를 위하여 단조 시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 실험결과와 해석결과를 비교한 결과, 매우 잘 일치하는 결과를 얻었으며, 단조 시뮬레이션 기술을 공정설계 및 최적화 목적으로 활용하였다.

후기

본 연구는 (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터의 정밀냉간단조평가시스템을 사용하여 이루어졌으며, 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 실시된 연구 결과의 일부임.

참고문헌

1. 박종진, 이정환, 이영선, “베벨기어 폐쇄단조의 유한요소 해석,” 대한기계학회 논문집, 20, 2458-2467, 1996.
2. 김동환, 정구섭, 김병민, “자동차용 차동 베벨기어의 최적 예비성형체 설계,” 한국자동차공학회논문집, 12, 184-189, 2004.
3. 김용조, 박성대, “베벨기어의 밀폐단조 공정설계를 위한 유한요소해석,” 한국기계가공학회지, 2, 92-99, 2003.
4. Lee, Y. K., Lee, S. R., Lee, C. H., and Yang, D. Y., “Process modification of bevel gear forging using three-dimension finite element analysis,” J. Mat. Proc. Tech., 113, 59-63, 2001.
5. Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., and Baldoukas, A. K., “Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE technique,” J. Mat. Proc. Tech., 57, 164-171, 1996.
6. Fu, M., and Shang, B., “Stress analysis of the precision forging die for a bevel gear and its optimal design using the boundary-element method,” J. Mat. Proc. Tech., 53, 511-520, 1995.
7. Meidert, M., Knoerr, M., Westphal, K., and Altan, T., “Numerical and physical modelling of cold forging of bevel gears,” J. Mat. Proc. Tech., 33, 75-93, 1992.
8. Yoon, J. H., and Yang, D. Y., “A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing technique,” Int. J. Mech. Sci., 32, 277-291, 1990.
9. 최상호, 전병운, 이민철, 박래훈, 엄재근, 전만수, “폐쇄단조용 복동링크유압식 다이세트의 개발,” 한국소성가공학회지, 15, 373-381, 2006.
10. Lee, M. C., Joun, M. S., and Lee, J. K., “Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation,” Finite Elem. Anal. Des., 42, 788-802, 2007.
11. AFDEX 3D, <http://engine.gsnu.ac.kr/~msjoun>